第 42 卷　第 1 期
2024 年 3 月

天　文　学　进　展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 42,　No. 1
Mar., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.13

基于文献分析脉冲星搜寻及应用研究进展

宋祎宁[1,2]，陈卯蒸[1,3]，刘志勇[1,3]

(1. 中国科学院　新疆天文台，乌鲁木齐　830011；　2. 中国科学院大学　天文与空间科学学院，北京　100049；
3.中国科学院射电天文重点实验室，南京　210033)

摘要： 脉冲星在天体演化、物理学、计时、深空自主导航、引力波探测等领域均有重要的学术和应用价值，脉冲星搜寻及其应用也成为了当前天文界热点研究之一。为了更好地探究脉冲星搜寻及其应用领域的研究现状和未来发展趋势，在 Web of Science (WOS) 数据库筛选出有关脉冲星搜寻及应用的 964 篇文献，在阅读核心文献的基础上，采用数据分析和可视化方法进行深入探讨。结果表明，脉冲星搜寻及应用领域的研究经历了初始探索阶段和稳健发展阶段，目前进入蓬勃增长阶段。该领域各国之间密切合作，形成了三大主要的研究群体。脉冲星搜寻及其应用研究在未来将产生如直接探测引力波、深空自主导航等重要科研价值和实际应用结果，将进一步丰富和多元化脉冲星的研究领域。

关　键　词： 脉冲星；脉冲星搜寻；数据分析；可视化；知识图谱

中图分类号： P145.6　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

脉冲星是由大中质量恒星演化到晚期，在超新星爆炸后形成的高速旋转的中子星，具有极高密度、极强磁场以及极稳定的周期等特性，是研究物质状态与特性的极端物理条件的天然实验室[1, 2]。脉冲星的物理特性使其在深空自主导航、时间基准、引力波探测等领域具有重要应用价值[1, 3]。作为最神秘的天体之一，脉冲星引起了广泛关注，因此，研究脉冲星的物理性质和搜寻脉冲星是近年来天文学领域的热点之一。近年来，在脉冲星搜寻与观测方面，国内外大部分大型射电望远镜都将其作为核心科学目标之一[4]。目前，已发现 3 300 多颗脉冲星[5]，其中脉冲星和脉冲双星的发现分别获得了诺贝尔物理学奖[6]。

文献是科学研究的重要成果之一，对其进行统计和分析研究可以挖掘研究领域中多个成果之间的潜在信息，有助于学者更好地了解研究领域的研究热点、发展方向和未来趋势等

收稿日期： 2023-05-15；　**修回日期：** 2023-07-10

资助项目： 国家重点研发计划 (2018YFA0404603)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费

通讯作者： 刘志勇，liuzhy@xao.ac.cn

信息，甚至可以揭示领域内的独特发现。一些基于文献计量的研究已经应用于天文学领域。例如，Isaksson[7]评估了芬兰天文学研究的情况，发现芬兰四个主要的研究机构之间缺乏合作，通过比较北欧国家的出版情况，发现瑞典和芬兰在天文学研究方面的活动比丹麦和挪威更强。Varga[8]提出了一种新的文章新颖性评估方法，可用于预测未来在天文学领域中具有高影响力的子领域的发展趋势。Wang 等人[9] 对与月球科学相关的两万多篇文章进行了分析，将月球科学的发展划分为三个阶段，并总结了领域内作者的合作情况，以帮助学者了解月球科学的发展规律。Graeme 等人[10] 分析了近百年来四大天文学期刊作者之间的合作情况，发现天文学领域逐渐呈现多作者发表论文的趋势，且大部分论文的第一、第二作者隶属于同一单位。James 和 White[11]研究了发展中国家和前苏联、东欧各国作者在天文学期刊中的论文数量的增加趋势，以及他们在合作或非合作研究方面的差异，并发现西方天文学者更受合作者的青睐。这些研究从不同角度对领域内的文献进行了较为全面和深入的分析，但针对脉冲星及其相关领域依旧存在空白。在脉冲星领域，一些学者从专业的角度发表了综述类的文章：Lyne[12]对脉冲双星的机制进行了介绍；Dahal[13]介绍了如何用毫秒脉冲星探测引力波；Zhou 等人[14]介绍了脉冲星周期跃变的探测方法、原因以及我国的发展现状；王元超等人[15]研究了脉冲星候选样本分类方法的发展历史和现状。这些综述类文献详细介绍了脉冲星特定领域的基础知识、现状，以及研究进展，帮助读者快速地掌握与理解该子领域的基础情况。然而，该类综述很难整体评估脉冲星搜寻及其应用领域的研究进展。

鉴于目前文献计量类文章在脉冲星及其相关领域的空白以及传统综述文章的局限性，本文旨在从文献分析的角度解读脉冲星搜寻及其应用的发展趋势，从宏观上解析该领域的态势，并深度挖掘文献间的潜在信息，总结我国与国际的发展现状，并提出一些意见。基于这一目标，本文对相关脉冲星搜寻及其应用领域的文献进行统计和分析。分析脉冲星搜寻研究的阶段性和原因，探究各国在该领域的研究发展情况，并进一步分析知名作者之间的合作情况。在分析国际态势基础上，针对中国的合作与地位进行分析，并提出改进计划。最后，根据文献中关键词的时间和频率，探讨脉冲星搜寻领域的研究热点及其发展趋势。

2 数据与分析方法

为了更好地了解脉冲星搜寻及其应用领域内的国家合作关系以及作者研究团体，本文使用了共现矩阵、聚类分析等技术，以生成脉冲星搜寻及其应用领域国家合作网络知识图谱和作者合作关系图谱。通过聚类分析，将作者团体进一步聚类成不同的子类。

2.1 数据来源与数据清洗

WOS 是综合性学术信息资源库，收录了自然科学、工程技术、生物医学等领域的多种核心学术期刊[16]。其“核心合集库”记录了文献作者、关键词、摘要、发表年份、论文被引量等多类信息。在 WOS 核心库中搜索 1967－2022 年期间题目和关键词包含“pulsar survey”、“pulsar search”、“pulsar selection”的文献，共获得 1 014 篇文章。剔除重复或不相关文章后，得到 964 篇有效文章。

上述文章在进行数据分析前，还需清洗数据。由于不同期刊对作者姓名、关键词等信息的记录方式存在差别，如作者“Lyne, A”与“Lyne, AG”为同一作者；关键词“pulsar: general”、“pulsars - general”在书写格式上存在差别；关键词“catalogs”、“catalogues”分别为同一单词不同写法。上述信息在数据处理过程中无法自动合并，需对文章信息进行精细的数据清洗。因此对文献信息进行识别，并将同类词进行合并、清洗。

WOS 核心数据库收录了大量的文章，除常规论文 (article) 外，还有会议 (proceedings paper)、笔记 (note) 等内容。部分文献信息存在缺失且常年未被学者引用，因此增加了数据处理的复杂度。在数据清洗过程中，可进一步提取“核心”论文进行更详细的分析。“文献被引量”是衡量论文影响力的主要指标，可用于筛选出领域内具有影响力的论文。由于领域内部分杰出文献的被引量极高，会明显提高整体文献的平均被引量，因此，本研究采用中位数作为筛选指标，提取被引量超过中位数的文献作为“核心”文献。此外，考虑到文章发表年份对被引量的影响，本文根据文章发表年份对数据进行切片，最终提取了每年被引量超过当年被引中位数的文献作为重点分析的文献。

2.2　分析方法

本文研究方法包括共现矩阵等技术，有助于生成脉冲星搜寻及其应用领域国家合作网络知识图谱和作者合作关系图谱。为了更好地了解领域内作者研究团体，对文献数据进行了统计和聚类分析，并使用这些数据进行了文献数据的挖掘和可视化呈现。

2.2.1　共现矩阵与合作网络

共现矩阵广泛应用于统计自然语言中不同单词在多个句子中的关系。在文献分析领域，共现矩阵对于后续合作网络知识图谱绘制和聚类起着重要作用。共现矩阵具有定量、直观和易于理解的优点。然而，在处理大量数据时，共现矩阵通常变得稀疏，且无法对不同单词赋予权重。因此，在分析过程中，本文假设文献的作者、国家等信息相互独立，并通过数据清洗 (详见 2.1 节) 以确保数据的合理性。在具体计算过程中，设 n 个句子共有 N 个不同的单词，则其共现矩阵为：

$$\boldsymbol{M}_{co}=\begin{pmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1N} \\ a_{12} & 0 & a_{23} & \dots & a_{2N} \\ a_{13} & a_{23} & 0 & \dots & a_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1N} & a_{2N} & a_{3N} & \dots & 0 \end{pmatrix}_{N\times N} . \quad (1)$$

该矩阵对角线上均为 0，表示单词本身；a_{ij} 表示第 i 个单词与第 j 个单词在 n 个句子中一起出现的频次，故 $a_{ij}\subseteq N^{+}, a_{ij}\in[0,n]$。在实际应用中，常在全部数据中选取部分高频单词计算其共现矩阵，并在共现矩阵基础上进行可视化或聚类分析[17]。

在共现矩阵的基础上，本文选择使用合作网络直观地展现文献中隐含的各类合作关系，以揭示学科内的社交网络结构。共现网络是分析文献的关键方法，其在文献分析中具有不可或缺的地位。然而，在进行分析过程中，需要对数据进行合理处理和筛选，因为过多的数据可能导致维度灾难，并且可能使合作网络的可视化和解释变得复杂和困难。

本文根据共现矩阵为高频词汇添加节点，将存在联系的节点连线，从而得到合作网络知识图谱。其中，使用中心度 (centrality) 量化节点的大小以表示各节点在合作网络中的重要性：

$$DC_i = \frac{c_i}{(N-1)} \quad , \tag{2}$$

其中，DC_i 为第 i 个节点的中心度，c_i 为第 i 个节点与其他节点相关联的个数，N 为全部节点数[18]。值得注意的是节点的中心度不等同于节点词频：特殊情况下，一个节点可能与多个节点相关，中心度较高，但词频较小；或者个别节点词频极大，但仅与个别节点相关，中心度较低。

2.2.2　TF-IDF 与聚类分析

除共现网络以外，聚类等方法也可以用于数据的合作网络分析和挖掘。本文使用统计方法词频-逆向文件频率指数 (term frequency-inverse document frequency, TF-IDF) 评估、提取文字数据中的关键信息，以实现聚类分析的预处理。尽管 TF-IDF 无法有效捕捉上下文的相关性，但它恰好符合文献分析中独立提取文献作者、国家等信息的需求。此外，TF-IDF 能够有效衡量词汇在文档中的重要程度，并且计算简洁，是文献聚类预处理的优选。TF-IDF 计算公式如下：

$$TF-IDF_{ij} = TF_{ij} \times IDF_j = \frac{x_{ij}}{\sum_k x_{kj}} \times \lg \frac{N}{f_j+1} \quad , \tag{3}$$

其中，$TF-IDF_{ij}$ 为第 i 个文件中第 j 个词的 TF-IDF 值；TF_{ij} 为第 i 个文件中第 j 个词频 (term frequency)；IDF_j 为第 i 个文件中第 j 个词的逆向文件频率；x_{ij} 为第 i 个文件中第 j 个词在文件 i 中出现的频次；$\sum_k x_{kj}$ 为第 i 个文件的词汇数；N 为文件个数；f_j 为包含第 j 个词汇的文件个数。

通过 TF-IDF 将自然语言转化为对应的频率矩阵后，可将文献进行聚类分析。本文选用 k 均值聚类算法 (k-means clustering algorithm, KMA) 进行聚类。KMA 易于描述、高效、适用于大规模数据。但需要提前确认聚类个数，易受随机初始聚类点影响，往往需要进行多次聚类，才能获得合理的结果[19]。针对聚类个数问题，可通过间隙统计量 (gap statistic) 确定。其计算公式为：

$$Gap(k) = E(\lg D_k) - \lg D_k \quad , \tag{4}$$

其中，D_k 为损失函数，$E(\lg D_k)$ 为 $\lg D_k$ 的期望，该值通过蒙特卡洛模拟产生。遍历聚类个数 $k = 1, 2, 3, \cdots, n$，计算 $Gap(k)$ 最大值，即为最优 k 值[20]。针对初始聚类点随机问题，Arthur 等人[21]提出类 k-means++ 算法对初始值的选择进行了改进，可以获得相对稳定的聚类结果。

3　数据挖掘与可视化结果

本章从发文量、发文国家、作者合作关系、关键词等角度对文献进行分析、可视化[①]，分析结果如下。

3.1　脉冲星搜寻及相关研究的发展阶段

年度发文量是反映研究领域总体发展趋势的重要指标。根据统计数据图 1 显示，1974－1990 年期间，脉冲星搜寻及其相关应用每年的发文量增长缓慢，仅有个位数的发文量。然而，自 1991－2008 年，发文量明显增加，在 2000 年出现了一个明显的峰值，其他年份发文量在 10~25 篇之间波动。从 2009－2022 年，发文量呈现明显的波动性增长。基于这些结果，可以将脉冲星搜寻的发展划分为三个阶段：初始探索阶段 (1974－1990 年)，稳健发展阶段 (1991－2008 年) 和蓬勃增长阶段 (2009 年至今)。

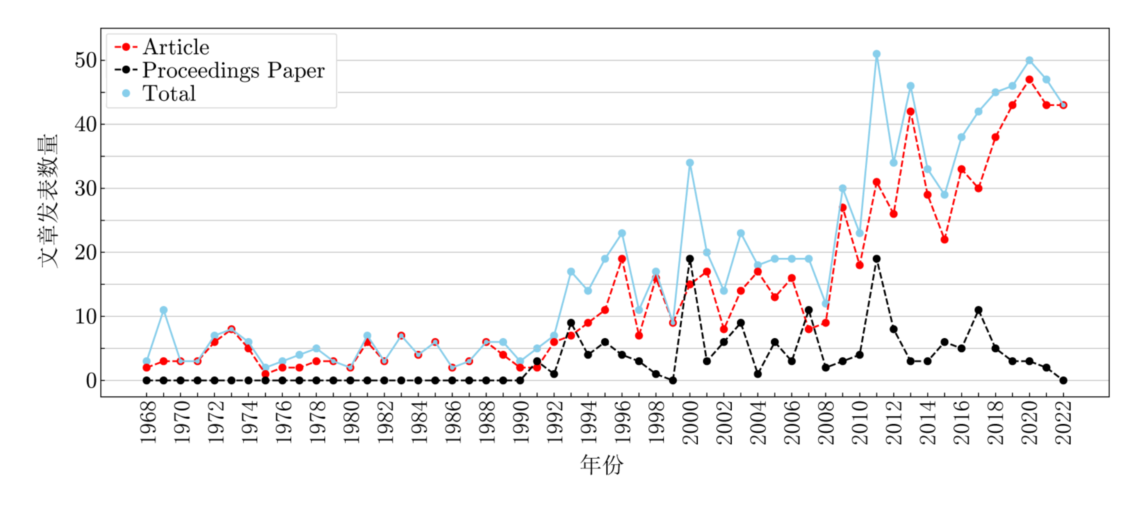


图 1　脉冲星搜寻及其应用领域每年发表的文章数量统计

从图 1 中可以发现到某些年份的论文数量明显高于其他年份，并呈现出波动性的特点。为了分析这些波动和峰值的原因，图 1 使用蓝色实线统计了总发文量，红色和黑色虚线分别统计了 Article 类文献与 Proceedings Paper 类文献的发文量。

具体分析这些峰值，可以发现 1969 年是脉冲星发现后的第二年，基于科研突破的延时效应，一些重要的搜寻进展以“Letter”的形式在该年向公众披露。而 2000 年的峰值与会议“177th IAU Colloquium on Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond”密切相关。该会议由 Kramer 等人主编，其中收录了 19 篇与脉冲星搜寻及其应用有关的内容，使该年发文量形成了明显的峰值。同样，2011 年的文献爆发与会议“Conference on Radio Pulsars - An Astrophysical Key to Unlock the Secrets of the Universe”有关，有 19 篇与脉冲星搜寻及应用相关的文献在该会议上发表。2013 年有大量的 Article 发表，部分原因是大型巡天项目

[①] https://github.com/Kassisong/bibliogarphy-analysis

高时间分辨率的宇宙脉冲星巡天 (the High Time Resolution Universe, HTRU) 的完成，促进了相关文献的产出。此外，2013 年也是脉冲星应用领域中引力波探测相关科学产出的大年，大约有 1/10 的相关文献在该年产出。

3.1.1 初始探索阶段 (1974—1990 年)

1967 年，Hewish 和 Bell 发现脉冲星[22]，标志着脉冲星及其相关研究的开端。最初几年，学者们主要致力于研究脉冲星的基础物理性质，当时脉冲星搜寻领域处于起步阶段，相关文章较少。这主要是由以下几点原因所致：

(1) 脉冲星搜寻项目寥寥无几。1990 年之前，由于对脉冲星辐射机制、产生和分布的理论认识不足，脉冲星搜寻项目非常有限，仅有两个大型相关搜寻项目。1977 年的第二次莫隆格勒巡天 (the 2nd Molonglo Survey) 项目发现了 244 颗脉冲星[23]，而 1983 年的第二阶段巡天 (the Phase II Survey) 则只发现了 20 颗脉冲星[24]。

(2) 观测时间受到限制。在 1990 年之前，脉冲星并未成为天文学研究的热门领域。像 Lovell 76 m 望远镜、Parkes 64 m 望远镜、Effelsberg 100 m 望远镜和 Arecibo 305 m 望远镜这些世界上主要的射电望远镜大多用于星系、恒星形成等热门研究领域，致使望远镜所分配给脉冲星观测的时间相对较少，且观测任务分散，导致一些脉冲星未被及时观测到。

(3) 脉冲星观测技术尚不成熟。在脉冲星搜寻的早期阶段，天文学家对脉冲星的物理特性了解有限，观测技术也还不够成熟。例如，望远镜的子信道划分不够精细，采样频率过低，巡天项目的观测频率不理想，数据处理、RFI 识别和抑制技术都还不够成熟，这些因素都导致许多脉冲星未被发现。如曾有学者设想脉冲星的周期不会短于 3 ms，导致他们与毫秒脉冲星 PSR B0531+21 失之交臂，直至 1982 年被 Backer 教授等人发现[2, 25]。

3.1.2 稳健发展阶段 (1991—2008 年)

这一阶段随着对脉冲星性质认识的逐渐加深，科研资金的投入，脉冲星搜寻的相关项目逐渐增多，导致脉冲星搜寻及应用的相关研究文献数量呈现了明显的增长。但由于学者数量有限，且大多科研成果集中在搜寻本身相关的成果上，因此每年产出文章数量有限。在这一阶段的发展中，有以下几个重要特点：

(1) 脉冲星观测项目增加。1991－2008 年期间，澳大利亚的 Parkes 64 m 射电望远镜展开了多次巡天，包括 20 厘米巡天 (20 cm Survey)[26]、南方脉冲星巡天 (Southern Pulsar Survey)[27]、多波段脉冲星巡天 (Multibeam Pulsar Survey)[28]等，发现了大约 2 000 颗脉冲星[29]，其中仅多波段脉冲星巡天发现了 1 400 余颗脉冲星。此外，BGT (Robert C. Byrd Green Bank Telescope)[30]、Arecibo (Arecibo Telescope)[31]等望远镜也展开了多次巡天。这些项目极大丰富了脉冲星的数量，并为后续的科学研究、学科的繁荣打下基础。

(2) 多波束接收机的广泛应用。以 Parkes 为例，其在原有接收机的基础上增加了多波束接收机，可同时指向多个方向进行信号接收，从而大大提高了脉冲星搜寻的效率[28]。随着对脉冲星重要物理和应用价值的认识加深，Arecibo、GBT、LOFAR 等射电望远镜也将脉冲星观测作为主要研究目标之一，配置多波束接收设备，开展搜寻及其相关研究[32]。

(3) 科研人员数量相对较少。这一阶段，已经有一些学者对脉冲星有更深入的认识并进

行了大量的搜寻工作。然而，大批的科研人员仍处于培养阶段，学科的应用领域发展尚处于起步阶段，许多跨学科的研究尚未正式开展。因此，这一阶段的科研文章数量相对有限。但这种前期的科研积累为后期领域的蓬勃增长奠定了坚实基础。

3.1.3 蓬勃增长阶段 (2009 年至今)

经过对脉冲星 40 余年的搜寻与研究，脉冲星的神秘面纱逐渐被揭开。近年来，脉冲星的应用和搜寻算法得到了快速发展，吸引了众多学者参与跨学科的研究，为脉冲星的搜寻和应用领域带来了多样性的发展，目前正呈现蓬勃增长的态势。

(1) 新型观测设备的建立。近年许多国际性的大型射电望远镜和阵列已经投入使用或正在建设和设计中，如 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST)[33]、平方千米阵列望远镜 (Square Kilometer Array, SKA)[36]、梅尔卡特射电干涉阵列 (MeerKAT radio telescope)[35]等。使用这些大型望镜和阵列，可以非常有效地观测到更深、更暗的脉冲星，并为脉冲星的相关应用提供关键支持。

(2) 脉冲星巡天项目的继续开展。近年来还展开了 HTRU[37]、绿岸北半球脉冲星巡天 (the Green Bank Northern Celestial Cap Pulsar Survey, GBNCC)[38]、巨米波射电望远镜高分辨率南天脉冲星和瞬变天体巡天 (GMRT High Resolution Southern Sky Survey for Pulsars and Transients)[39]、低频射电阵列脉冲星和快速射电瞬变试验性巡天 (the LOFAR Pilot Surveys for Pulsars and Fast Radio Transients)[40]、FAST 银盘脉冲星快照巡天 (the FAST Galactic Plane Pulsar Snapshot Survey)[41]等巡天项目。这些搜寻项目进一步扩大了巡天的深度和广度，不仅发现了许多信号更微弱的脉冲星，更丰富了脉冲星候选体的数量，为脉冲星智能识别等跨学科研究、应用打下了基础。

(3) 技术发展与跨学科应用。随着计算机技术的不断提升，学者们有能力挖掘出以往脉冲星候选记录中的潜在脉冲星候选体。例如，Faulkner 通过运用图像分类系统 REAPER 重新处理 PMPS 的观测数据，成功发现了 128 颗残存于数据中的脉冲星[42]。近年来，计算机科学、信息工程等领域的学者也广泛参与到脉冲星搜寻算法和管道的设计中，并取得了一些显著的成果[43, 44]；同时，脉冲星的相关应用也在近年来蓬勃发展，最广为人知的包含引力波探测和导航等研究[45, 46]。

总而言之，脉冲星搜寻及应用发展至今，经历了初始探索阶段与稳健发展阶段，目前进入了蓬勃增长阶段。随着人们对脉冲星的认识不断加深，研究和观测项目也不断增多，越来越多的脉冲星被发现。近年来，Parkes、GBT、Arecibo、LOFAR、FAST 等望远镜相继开展了脉冲星探测项目，不断丰富了脉冲星候选体库，为后续研究提供了广阔的发展空间，未来还将会有大量高质量的论文问世。

3.2 发文国家分析

3.2.1 国际合作关系

分析不同国家在脉冲星搜寻及其应用领域的发文量和合作关系，有助于探索各国在该领域中的影响力。统计 1967－2022 年期间不同国家发表的论文数量，得到环形图 (若一篇论文有多个国家的作者，则各国论文数量各加 1)。该领域共有 51 个国家参与其中，图 2 列

出了发文量大于 30 篇的核心国家及各大洲的发文统计量。

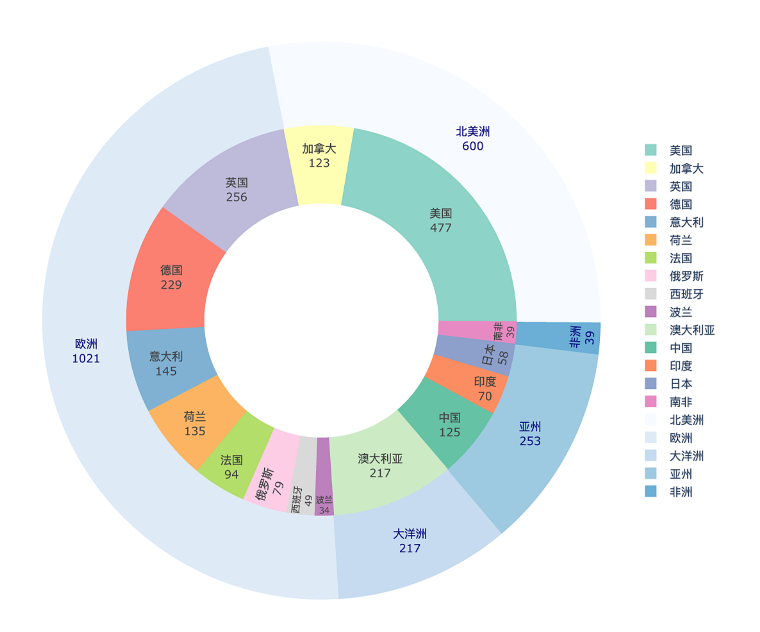


图 2　不同国家及大洲发文统计环形饼图

如图 2 所示，脉冲星搜寻及其应用领域中，美国占据领先地位。在 964 篇相关论文中，有近一半的论文创作有美国学者参与。作为最早进行天文学研究的国家之一，美国早在 20 世纪引进了许多天文学家并积累了丰富的人才储备。此外，美国还建造了许多高精度的大型望远镜 (如 GBT 和 Arecibo 等)，为科学研究提供了优越的设备条件。美国还建立了高端研究基地 (如美国国家航空航天局、美国国家射电天文台等)，为学者们提供了良好的研究环境。基于这些历史发展和大量的科研经费投入，美国在脉冲星搜寻领域具有绝对优势。

欧洲在该领域也有优势，发文量较多的国家中，一半以上是欧洲国家。欧洲拥有悠久的天文学研究历史和传统，为现代天文学研究提供了良好的基础[47]。同时，现代欧洲建造了许多望远镜，如埃菲尔斯伯格射电望远镜 (Effelsberg Telescope)、洛费尔望远镜 (Lovell Telescope)、RATAN-600(RATAN-600 Radio Telescope) 等，这为脉冲星的观测、搜寻、研究提供了坚实的基础[48, 49]。

在南半球，澳大利亚在脉冲星搜寻领域已取得极其显著的成就。其优越的地理位置使得澳大利亚可以观测到比北半球更广阔的星空。同时，作为南半球最发达的国家之一，澳大利亚建立了 Parkes、澳大利亚射电望远镜紧凑阵列 (Australia Telescope Compact Array, ATCA)、莫隆格勒综合孔径望远镜 (Molonglo Observatory Synthesis Telescope, MOST) 等多个射电望远镜和天文系统，为脉冲星搜寻领域提供了重要的基础设施。

亚洲的中国、日本和印度在该领域具有一定的优势。由于中国和印度在专业天文学领域起步较晚，其发文量相对较少。然而，近年来随着大量的科研经费投入和从事脉冲星研究的科研人员增加，中国和印度在该领域发展迅速。值得注意的是，一些亚洲学者倾向于用本地

语言写论文[6, 50]，这导致部分具有科研影响力的论文未被纳入分析范围之内。

在非洲，南非在该领域的研究中处于领先地位，其发文量最多。南非位于南半球，气候干燥，海拔高，为射电天文学研究提供了良好的观测条件，是射电望远镜的热门选址地点。此外，当地政府的大力支持，例如 MeerKAT 和 SKA 的设立[51]，也为脉冲星搜寻领域的研究提供了广泛的前景。

在上述统计结果的基础上，计算各国的共现矩阵与各国中心度以探究各国之间的合作关系，得到各国合作关系网络如图 3 所示。

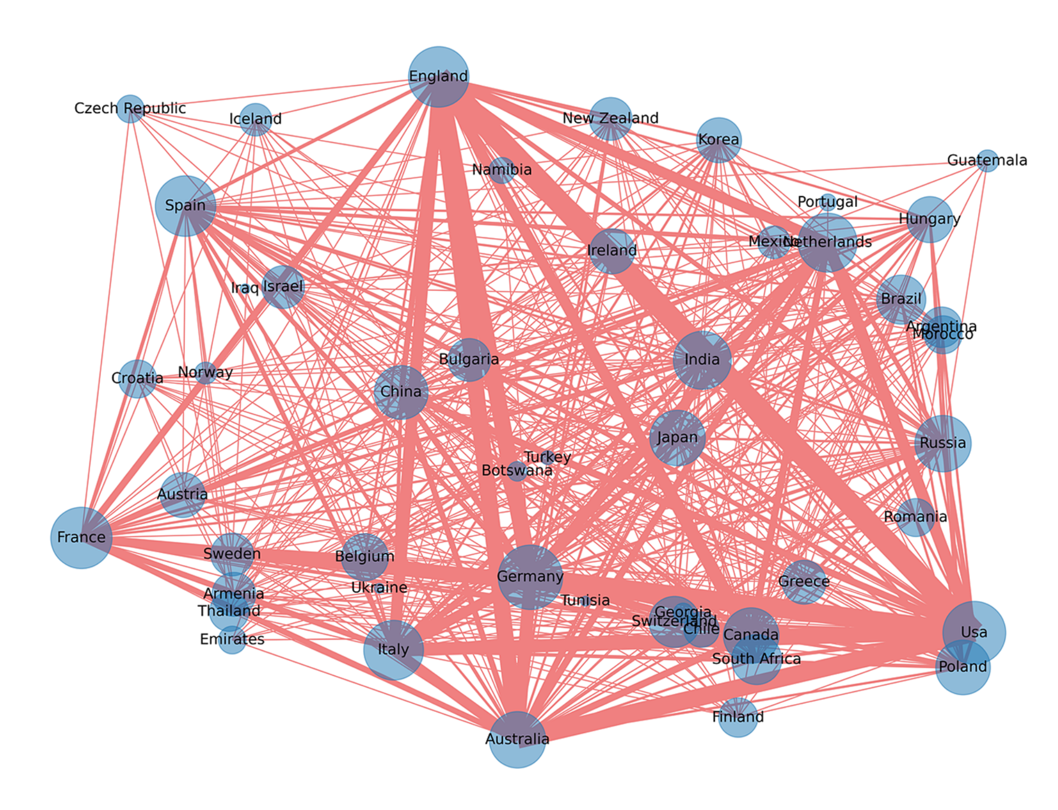


图 3　各国的发文合作网络知识图谱

图 3 中的节点代表国家间合作关系的中心度，节点越大表明该国与其他国家的合作关系越密切；连线粗细反映了两个国家间的合作关系，线条越粗说明两国合作越密切。由合作网络知识图谱可知，美国、澳大利亚、英国、俄罗斯、德国、日本、荷兰、意大利等国家与其他国家合作最广泛。其中，美国、德国、英国、澳大利亚、意大利等国形成了密切的合作关系网络。整个合作网络连线非常丰富，且无明显聚类关系，这表明脉冲星搜寻及其相关应用的研究是全球性合作的研究，许多研究成果是各国学者通力合作的结果。这种密切合作关系汇聚了全球的观测设备、脉冲星研究相关项目以及优秀的学者，有利于攻克领域内难题并进行创新性的研究。目前，越来越多的国家参与到脉冲星搜寻及相关课题中，并建立了密切合作关系。

3.2.2 中国合作关系

针对中国与其他国家的合作现状，本文提取有中国参与的 125 篇文献进行分析。统计各国与中国合作的文献数量得到图 4，使用式 (1) 计算中国合作关系的共现矩阵、从而得到合作网络知识图谱，如图 5 所示。

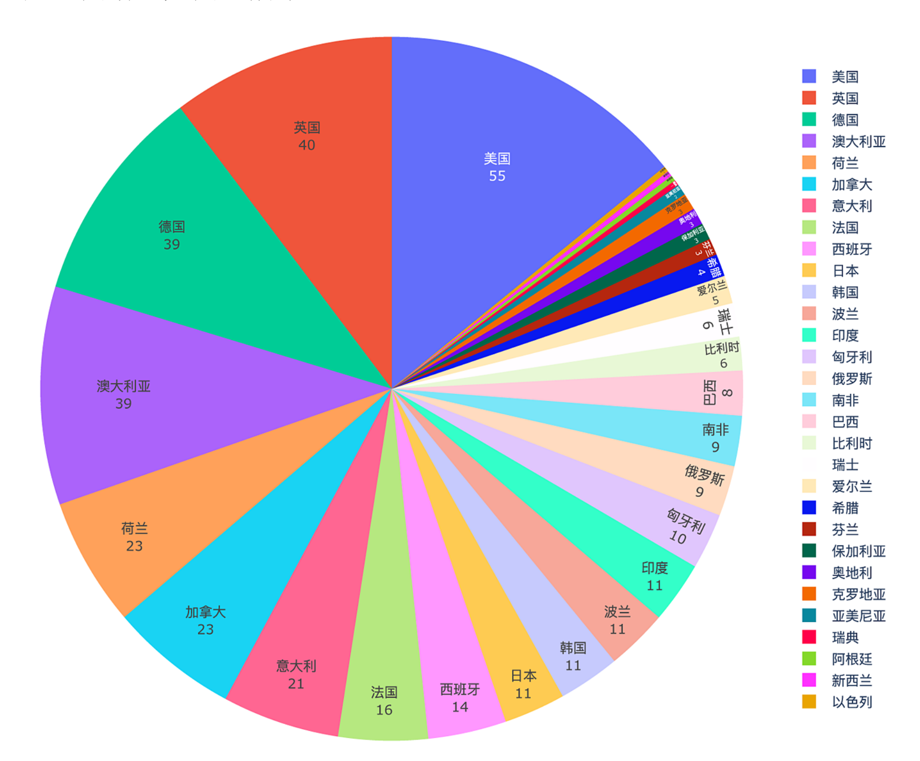


图 4 中国与各国合作文献数量统计图

由图 4 可知，中国和各国的合作文献数量与各国的发文量基本成正比。表明在脉冲星搜寻及其应用领域，中国与各国的合作保持着相对良好的关系，进一步说明了天文学领域呈现出国际化和密切合作的趋势。

通过分析中国的合作网络知识图谱中节点的大小 (见图 5)，发现中国的中心度相对较低，在各国合作中的领导能力与核心性相对不足，而西方发达国家在合作中更具中心地位。为提高中国在该领域的国际地位，一方面要加强对中国青年学者、研究生的培养，引进国际知名学者；同时要继续建设属于自己的大型观测设备，建立以中国为核心的脉冲星搜寻体系，并推动、主导一些大型合作项目，以增强中国在脉冲星搜寻及应用领域的核心作用。

3.3 作者合作关系分析

3.3.1 论文作者数量分析

合作关系分析是了解该领域研究现状、发展趋势以及深度和广度的重要手段。图 6 以每 5 a 为间隔，展示了论文不同合作者人数所占百分比随时间变化的趋势。通过分析图 6，可以更好地了解脉冲星搜寻及其应用领域的研究发展状况。

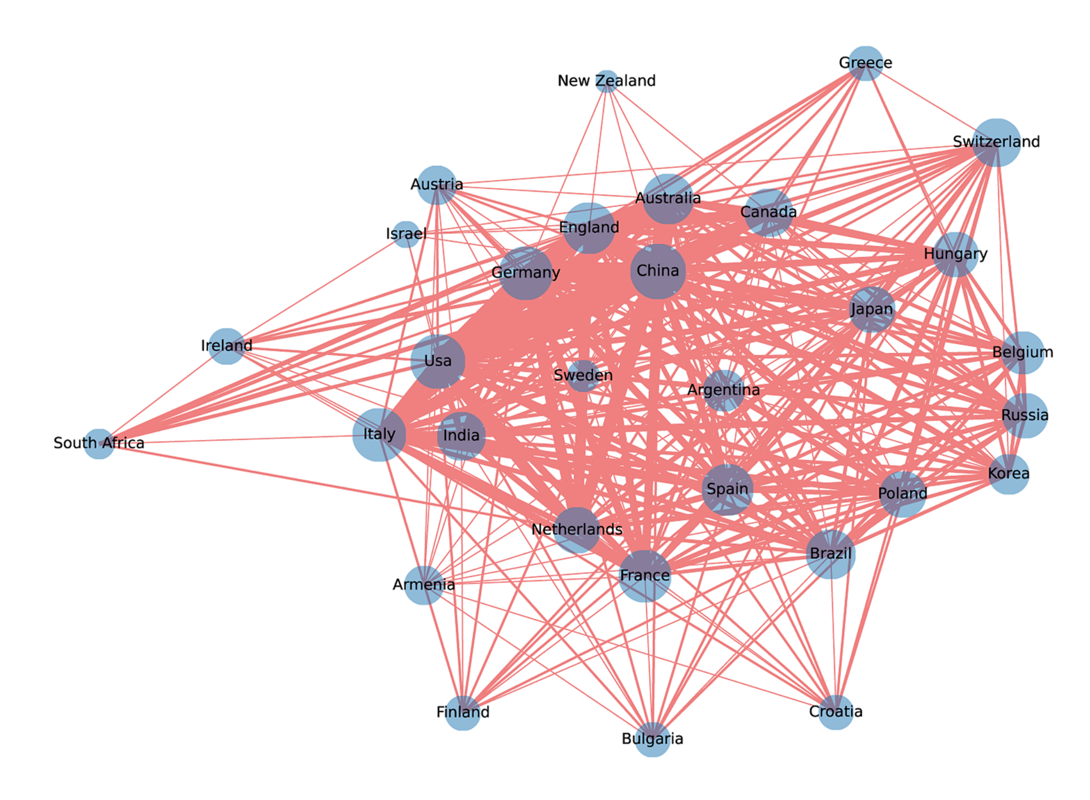


图 5　中国与各国合作网络知识图谱

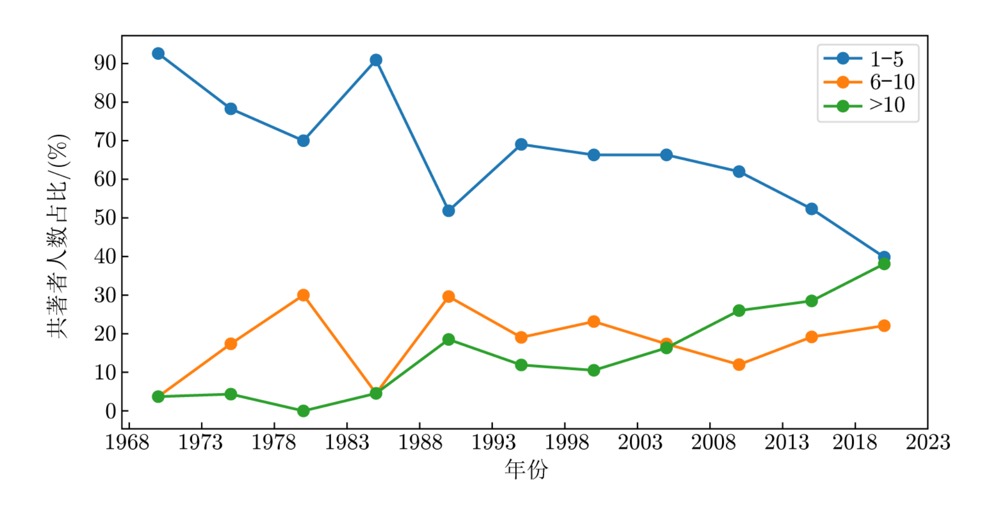


图 6　合著者人数的百分比

通过分析图 6 的发展趋势，发现在脉冲星搜寻领域中，1~5 人的合作者占比呈现明显下降的趋势，6~10 人的合作者占比则在 5%~35% 间波动变化，而 10 人以上合作的占比呈现稳定增长趋势，目前占比基本与 1~5 人持平。随着脉冲星搜寻及其应用的研究不断拓展和深入，逐渐涉及到多个学科领域的交叉与融合。例如，近年来脉冲星搜寻在探测暗物质、引力波天文学和宇宙学方面的应用广受关注。这些前沿领域的研究需要更多不同学科领域的学者进行合作，以实现更深入的研究和发现。多作者合作逐渐成为脉冲星搜寻及其应用领域的一种趋势，在一些大型项目中，论文作者数量甚至超过 500 人[52]。随着脉冲星搜寻及其应用领域的发展，多作者合作已经成为一个普遍的趋势。在未来的研究中，应该继续推进不同学科领域的交叉与融合，以进一步深化对脉冲星性质和其应用的理解。

3.3.2　论文作者合作关系图谱

为了将作者之间的合作网络可视化，根据 2.1 节中的方法筛选出核心文献 446 篇，共有 5 434 名作者参与其中。并根据论文被引量进行排序，计算作者之间的合作网络，最终选择了发表文章超过 12 篇并与其他作者合作大于等于 5 次的作者 (两个作者合作次数大于等于 5 次，则进行连线)，最终得到了 87 名超核心作者，他们的合作网络知识图谱如图 7 所示(由于合作网络复杂，图中虚线合作团体仅作示意，不严格代表单个作者所属团体)。

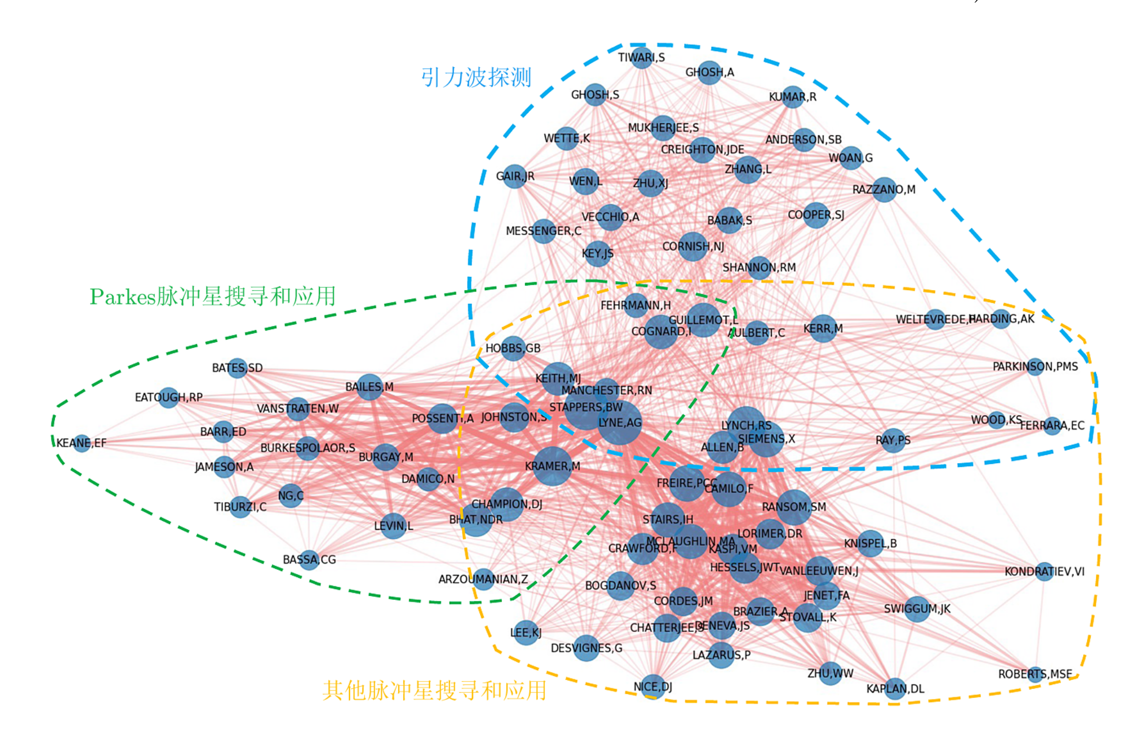


图 7　脉冲星搜寻领域论文作者合作关系图

在此基础上根据论文作者对论文进行聚类分析，整体上可以将这些作者分为 3 大类，分别为：(1) 澳大利亚 Parkes 巡天及应用合作团队；(2) Arecibo、GBT、Fermi-LAT 等大型设备巡天及应用合作团体；(3) 脉冲星引力波探测研究合作团体。

Parkes 是南半球最大单口径射电望远镜，建设年代较早，在多年的研究过程中，展开了 Southern HTRU[37]、多波段巡天[28]、20 cm Survey[26]、Southern Pulsar Survey[27]等项目。这些项目历时多年，观测设备、方法和数据处理能力均逐渐优化。在不断发现新的脉冲星，研究脉冲星性质和应用脉冲星进行更深奥的应用研究的同时，相关科研人员和巡天项目主要负责人也逐步实现了迭代。在所有的搜索项目中，HTRU 脉冲星巡天项目和多波段巡天项目产生了非常显著的影响。

美国作为天文学领域最发达的国家之一，与多国保持密切的合作关系。这类国际合作团体多使用较先进的望远镜进行观测和研究，如 GBT、Arecibo、Fermi-LAT、FAST、SKA 和 VLA 等。例如，Arecibo 展开了PALFA 巡天[31]，该项目不仅涉及天文学家和工程师对脉冲星进行搜寻和识别，还有许多天文数据分析学者针对该项目提出了各种算法改进，以提高搜寻效率和识别准确率[53]。Fermi-LAT 展开了多次脉冲星盲搜，并发现了许多伽马射线脉冲星[54]。正如第 3.2 节所述，现在整体合作趋向全球化，合作团体关系相对复杂，也存在着其他国家为主导的大型脉冲星巡天项目。例如，近年来中国学者与其他国家学者合作使用 FAST 展开了脉冲星巡天项目，截至目前已发现 740 余颗脉冲星[41, 55]。

引力波探测是当前天文学领域备受瞩目的热点之一。在此领域中，使用脉冲星及其时间序列是一种主流方法，广受国际认可。作为脉冲星的主要应用之一，引力波探测领域吸引了众多知名学者的参与。引力波探测通常依赖于高度敏感的大型设备，如 LIGO[56]、Virgo[57]、LISA 等，这些探测项目的开展需要大量学者的合作，而某些论文的合作作者超过 500 人[52]，具有较大的影响力。

总体而言，大多数合作都基于大型望远镜设备和大型巡天项目。这些项目大多有许多知名学者参与，且合作关系密切。如图 7 所示，Lyne、Stappers、Manchester 等人在各团体均有合作产出[58–60]，他们是脉冲星搜寻及其应用领域内的“桥梁”人物。这些“桥梁”学者享有较高声望，吸引了大量学者参与合作，促进了合作关系的紧密性和广泛性，加强了各国之间的合作密切程度。这种多维度、多作者的合作关系有利于脉冲星搜寻及其应用领域的良性发展，也从侧面反映了整个科研界未来发展的趋势。

3.3.3 中国学者在国际中的合作现状

在上述提取的核心论文的基础上，本节进一步独立提取中国学者参与的论文，并对中国脉冲星搜寻及应用领域在国际上的发展现状进行分析。从 419 篇核心论文中筛选出 60 篇中国学者参与的论文 (作者单位属于中国)。考虑到类似 LIGO 引力波探测等大型合作项目有数百甚至上千名作者参与，对一般合作网络的分析影响较大，因此，本文根据作者数量将合作类型进行分类：将作者人数小于等于 99 人的文献定义为普通合作项目的科研产出，而作者人数大于等于 100 人的文献定义为大型合作项目的科研产出。统计得到 47 篇普通合作文献和 13 篇大型合作文献，表 1 列出了在这些合作项目中发文量较多的作者信息。

从表 1 可发现，中国作者与该领域最杰出学者，如 Lyne 和 Hobbs 等人合作较为密切。同时，Hobbs 近年与中国科学院大学合作，可以促进中国学生培养与国际合作。Zhu 参与了许多引力波测领域的研究。Zhu、Lee、Dai 等学者在中国脉冲星搜寻领域做出了较为杰

表 1 中国脉冲星搜寻及应用领域合作作者发文量统计

作者	全部合作论文数量	普通型合作论文数量
Lyne	18	10
Hobbs	17	13
Zhu	17	7
Stappers	15	7
Manchester	14	12
Ransom	14	12
Lynch	14	7
Chatterjee	12	11
Freire	12	9
Cordes	11	10
Zhu	10	10
Crawford	10	9
Mclaughlin	10	9
Lee	9	8
Dai	9	8

出的贡献。总体而言，中国学者在该领域取得了一些卓越的贡献，但他们大多是青年科学家，仍处于快速成长阶段，应持续增强对这些青年学者项目、科研的支持，以提升他们的国际影响力并提高中国学者在该领域的国际地位。

通过计算普通合作的共现网络和大型合作的共现网络，以分析中国作者的发展现状。在普通合作的 47 篇论文中，筛选出发文量大于等于 3 篇的作者，并在图 8 中展示彼此合作次数大于等于 2 次的合作关系。

从合作网络中可以发现 Zhu、Lee、Dai、Wang、Liu、Han、Li 等学者与其他学者合作较为密切 (绿色虚线大圈)。此外，本文还标注了其他合作网络中较明显的中国学者 (绿色虚线小圈)。通过对这些学者的分析，发现其中少部分学者目前在国外进行科研工作，其所属单位并不在中国。从整体聚类、合作关系来看，中国的合作网络主要有 4 个团体：左侧的与美国合作的团体、右上的与澳大利亚合作的团体、右下的与欧洲合作的团体以及最右侧的本国团体。

由图 8 可知，相比其他国际合作团体，中国本国的合作团体规模最小，合作密度相对稀疏，这可能有以下几个原因。

(1) 中国的大型望远镜项目，如 FAST 等，建设相对较晚，近年来才逐渐有科研成果产出，还需要时间进一步发展。而其他将在国际上产生重大影响的大型望远镜项目，如新疆奇台 110 m 全可动射电望远镜 (QiTai radio Telescope, QTT) [4]、景东 120 m 全可动射电望远镜 (Jingdong Radio Telescope, JRT)[34] 等，仍处于建设和设计阶段，需要长时间的前期投入，后续才能有大量持续的科研产出。

(2) 与相其他发达国家相比，中国脉冲星相关研究起步较晚，研究者数量较少。目前该

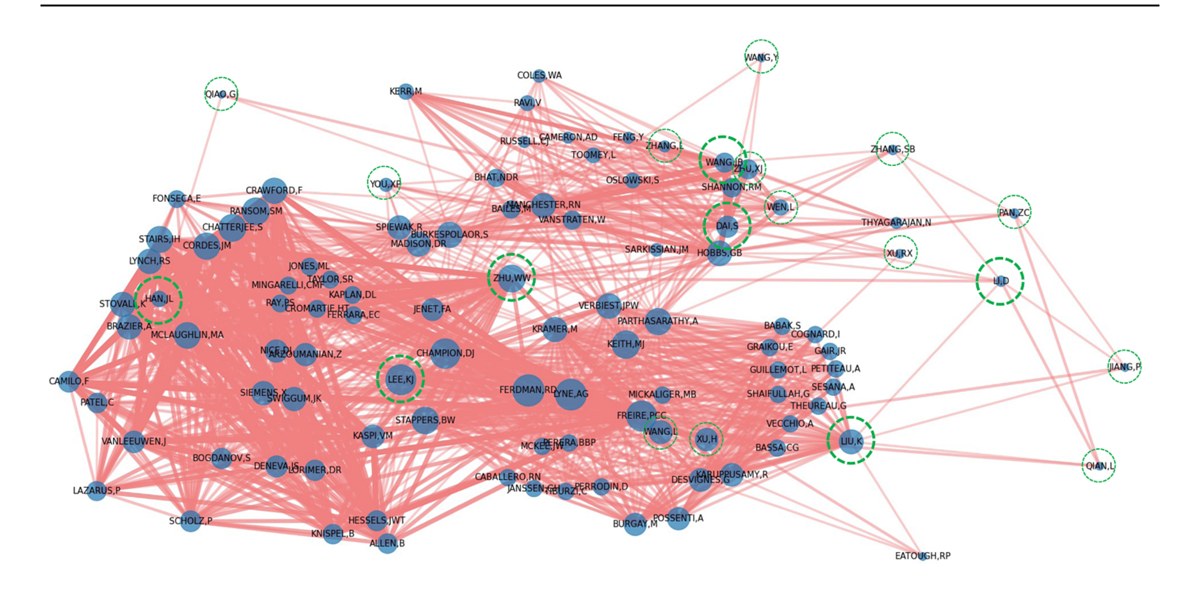


图 8　中国作者普通合作国际合作关系图

领域大部分是有留学经历的青年学者，与国外学者合作相对密切，导致目前的国内合作相对稀疏。随着青年学者地位的逐渐提升，国内合作网络未来可能变得更加密集。

(3) 中国的天文学者与其他国际团体的合作相对较少。其一，在该领域最具有科研话语权的几个国家基本上使用英语或近似的日耳曼语支，使其在国际交流和合作方面更加便利，亚洲学者在该方面不占优势；其二，中国的科研发展一定程度上受限于国际关系，欧美国家更倾向于彼此间相互合作[11]。因此，中国需要继续建设大型高端观测设备、培养国内学者、引进国外优秀人才，以增强中国在该领域的国际合作网络。

(4) 中国的天文学类期刊被 SCI 收录的较少，中国仅有 RAA (Research in Astronomy and Astrophysics) 和 Science China-Physics, Mechanics & Astronomy 两个天文领域的英文期刊。很多新生代学者、研究生受限于合作网络、学术能力等因素，常选择国内核心期刊进行投稿，参与国际合作较少，导致中国内部合作网络在国际中稀薄。一方面要增强国内期刊的发文量、被引因子，也要鼓励相关机构创办天文学类英文期刊，为中国学者提供更多 SCI 收录的期刊选择，并提升其国际学术界的归属感。

总体而言，中国应持续建设大型高性能观测设备，鼓励学者参与国际合作，鼓励创建天文及其相关领域的英文期刊。

3.4　关键词分析

论文关键词涵盖了论文所涉及的领域、子领域、主题和研究问题，可以较好体现领域内的热点。通过对文献关键词的分析，可以探索研究热点和研究前沿，帮助学者选择后续研究方向[61]。对文献关键词进行了清洗和筛选，得到 61 个出现次数大于等于 4 次的有效关键词。根据它们的出现频率和第一次出现的时间，得到了关键词频次和时间序列图 (见图 9)。在图中，关键词出现频次越高，对应的点和字体越大；同时，关键词在图中对应时间代表该

关键词在文献中第一次出现的时间。文献中最早的关键词出现于 1991 年，图中的时间线也自 1991 年开始。

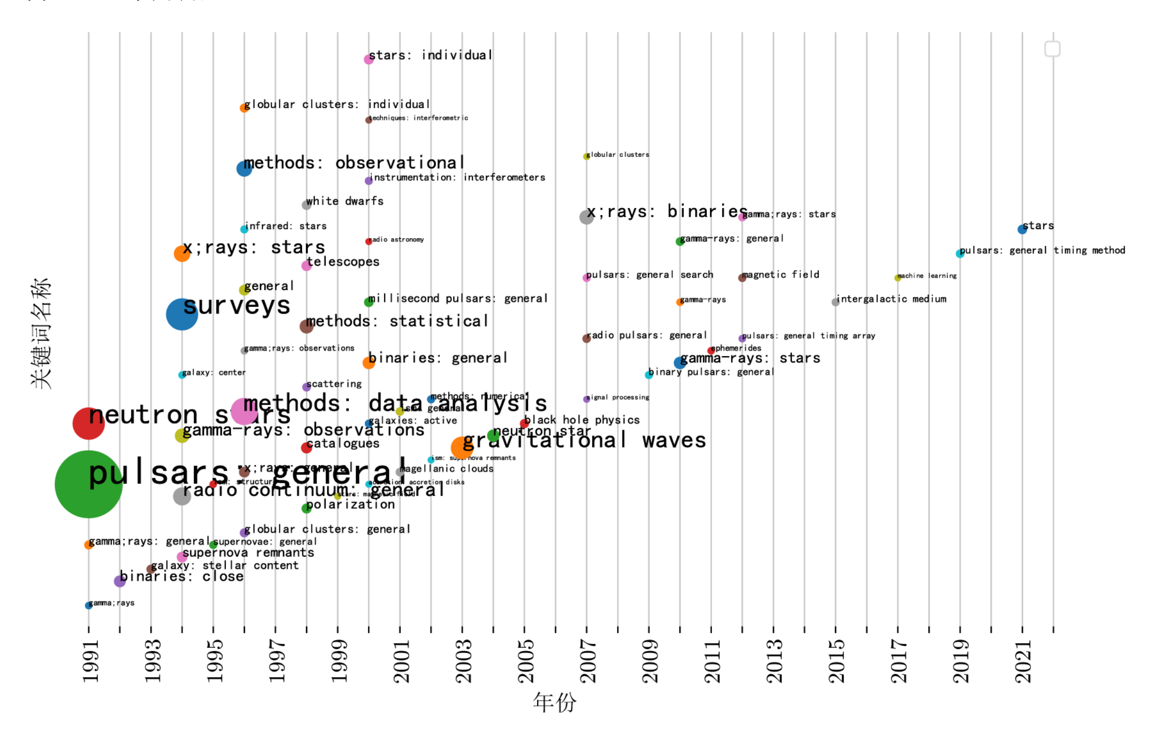


图 9　脉冲星搜寻及其相关应用文献关键频次与时间序列图

图 9 显示出“pulsars: general”在关键词出现之初就已经出现，且频次最高，几乎所有领域内的文章均包含该关键词，是领域内研究的基础。虽然于 1994 年出现的“surveys”是频率较高的关键词，但部分脉冲星搜寻文献的关键词并未包含“survey”，导致“survey”在图中的占比比预期低[37, 41]。除此以外，“neutron stars”、“x-ray: general”、“radio continuum: general”、“gamma-rays: star”、“binaries: close”等关键词大多与脉冲星的基础性质有关，主要包含：(1) 概括搜寻到新脉冲星的性质[38]；(2) 对现有脉冲星性质、参数进行观测、计算与更新[62]；(3) 针对特殊脉冲星搜寻设计的算法[63]；(4) 在现有研究基础上探测到一些奇特脉冲星与特殊现象，如巨脉冲、间歇脉冲星、脉冲消零等[64],这些关键词是长期开展脉冲星搜寻的基础。近年来，与搜寻数据处理方法相关的关键词，如“method: data analysis”、“methods: observational”、“methods: statistical”等逐渐成为领域内主要研究热点之一[63, 65, 66]，并受到学者的广泛关注，新脉冲星的发现离不开对海量数据的有效筛选、分析、挖掘。除此以外，“gravitational waves”探测是目前最知名、热度最高的脉冲星应用，同时深空自主导航、快速射电暴探测等也是脉冲星的主要应用，为人类探索宇宙提供了重要的研究线索[67]。

从关键词时间序列上，可发现一些出现时间较晚，但频次较高的关键词，如 2003 年出现的“gravitational waves”、2007 年出现的“x-rays: binaries”、2010 年出现的“gamma-

rays: stars”等均在短时间内出现频次较高。这些词在短短十几年甚至几年内引起了学者的重视，是研究领域的研究热点与前沿。

目前，被探测的脉冲星数量已有三千余颗，未被发现的脉冲星的信号一般非常微弱或奇异，因此，目前脉冲星搜寻更依赖于大口径、高性能的望远镜，以及更长时间的搜寻以提高搜寻灵敏度。因此，如何在海量数据中筛选出暗弱、特殊的脉冲星候选体，并进一步识别脉冲星，成为该领域近年来的主要重难点之一。目前，硬件性能、计算复杂度、数据挖掘、观测条件等，均限制着该领域的突破，而机器学习、深度学习以及 GPU 并行计算等方法逐步应用于脉冲星搜寻及其数据处理过程中，并已取得阶段性的进展。这些方法可能在未来成为脉冲星搜寻领域研究的新热点[29, 68]。在应用领域，尽管脉冲星具有重要价值，但大部分应用仍处于起步阶段。例如，通过脉冲星探测引力波已经被多方论证科学性与可行性，但截至目前，仍未有团队真正通过脉冲星观测到引力波。脉冲星深空自主导航领域研究也在快速开展，但进展较慢，距离实现还有很多问题需要解决。总体而言，脉冲星应用前景非常广泛，随着观测平台、数据处理方法及分析能力的提高，将进一步提高脉冲星搜寻的效率，为脉冲星相关应用提供扎实的研究基础[45, 46]。

4 结　论

在脉冲星搜寻和应用领域，相关研究已经积累了大量的文献和数据，其中在 WOS 核心数据库中，与脉冲星搜寻及应用相关的文献共 964 篇。基于这些文献的深入分析，得到以下结论：

(1) 经过射电望远镜技术和人工智能等方面的进一步推动，脉冲星搜寻及其应用研究领域已完成初始探索阶段与稳健发展阶段的积累，实现了到蓬勃增长阶段的转变。该领域早期的发展曾受到对脉冲星性质了解有限、观测设备以及算法技术不发达等因素的影响，导致脉冲星搜寻及其应用领域的发展相对缓慢，但随着对脉冲星性质和应用范围的深入研究，观测设备、算力、算法等的快速发展，近年来该领域也蓬勃发展，进入了蓬勃增长阶段。

(2) 脉冲星搜寻及其应用领域在国内外已经形成了密切的合作关系。脉冲星的搜寻观测、数据处理和分析需要先进的设备、大量的计算资源及跨多领域的科学分析能力，这不仅促进了脉冲星搜寻的迅速发展，同时促进了脉冲星搜寻跨领域的深度合作。近年来，越来越多的国家和机构加入脉冲星搜寻研究，推动了该领域的发展。例如，澳大利亚使用 Parkes 开展多次巡天，美国使用 Arecibo 和 GBT 进行巡天。而中国 FAST 的投入使用，进一步促进了脉冲星搜寻及相关研究的发展与国内研究合作关系。随着这些项目的开展，领域内的国际合作形成了一个紧密的合作网，并推动这一领域的快速发展。Lyne、Manchester 等人在该领域做出了杰出贡献。他们的学术影响力促进了不同国家学者之间的合作，推动了新技术和方法的发展，也吸引了新一代年轻科学家，促进了脉冲星搜寻研究领域的发展。

(3) 近年来，高灵敏度望远镜、天文数据的高效处理以及数据挖掘等技术受到天文学界重视。未来的研究重点可能主要集中在高灵敏度望远镜建设和算法的发展方面，如 SKA、

QTT 等望远镜正在建设中。这些望远镜将能探测到更深、更微弱的脉冲星信号，并使用新算法更加高效和精确地处理和分析数据。而现在正在研究测试的各类 GPU 并行计算，实时数据处理等脉冲星搜寻算法将极大提高脉冲星搜寻到的数据的处理效率。同时，脉冲星因其独特性和稳定性备受学者青睐，在计时、深空自主导航、引力波探测、定位等领域均有广泛应用前景。随着脉冲星探测领域的发展日趋成熟，未来脉冲星应用将迎来快速发展，其所产生的诸多重要科研价值和实际应用结果也将受到广泛关注。

(4) 通过中国在该领域的发展现状可知，随着 FAST 等大型观测设备的投入使用，近年该领域的相关学术活动逐渐增多。然而，由于发展时间较短，新生代学者仍在培养，中国在该领域仍处于相对边缘的位置。但随着 FAST 脉冲星相关研究的继续深入，QTT、JRT 等高精端观测设备的建设，中国将逐渐加强在该领域的硬实力与核心地位。同时，目前许多中国学者已经跨领域参与脉冲星候选体识别、脉冲星导航等领域的研究，并取得了突出成果，为中国今后在该领域成为核心探索国奠定了坚实的基础。

总体而言，脉冲星搜寻及其应用领域的国际发展呈现蓬勃发展的态势，随着计算能力的提升和大型设备的建立，未来将会产生更多的科研成果。虽然中国目前在国际上的核心地位有待提高，但通过大型设备的建设、资金的投入、学者的培养以及跨学科的合作，中国在脉冲星搜寻及其应用领域的地位将会明显提升。

参考文献：

[1] Lyne A, GrahamSmith F. Pulsar Astronomy. 4th Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 1
[2] 吴鑫基, 乔国俊, 徐仁新. 脉冲星物理. 北京: 北京大学出版社, 2018: 1
[3] Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 1
[4] Wang N. Scientia Sinica-Physica Mechanica & Astronomica, 2014, 44(08): 783
[5] https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/, 2023
[6] 王娜, 吴鑫基. 天文学进展, 2000, 3: 229
[7] Isaksson E. Library and Information Services in Astronomy VI: 21st Century Astronomy Librarianship, from New Ideas to Action. Isaksson E, Lagerstrom J, Holl A, et al. eds. California: Astronomical Society of the Pacific, 2010, 433: 116
[8] Varga A. ApJS, 2018, 236(01): 15
[9] Wang J, Chen Y, Liu G, et al. Open Astronomy, 2020, 29(01): 251
[10] Graeme H S. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 128: 14
[11] James C, White I I. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1992, 104(676): 472
[12] Lyne A G. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2006, 6: 162
[13] Dahal P K. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2020, 41: 1
[14] Zhou S Q, Guegercinoglu E, Yuan J P, et al. Universe, 2022, 8: 12
[15] 王元超, 郑建华, 潘之辰, 等. 深空探测学报, 2018, 5: 3
[16] Bergman E M L. Journal of Academic Librarianship, 2012, 38: 370
[17] 周磊, 杨威, 张玉峰. 情报杂志, 2014(06): 32
[18] 高岩. 硕士论文, 吉林: 吉林大学, 2012
[19] Ahmed M, Seraj R, Islam SMS. Electronics, 2020, 9(8): 1295
[20] Tibshirani R, Walther G, Hastie T. Journal of The Royal Statistical Society Series B-Statistical Method-

ology, 2001, 63(02): 411
[21] Arthur D, Vassilvitskii S. Proceedings of The Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 2007: 1027
[22] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Nature, 1968, 217(5130): 709
[23] Manchester R N, Lyne A G, Taylor J H, et al. MNRAS, 1978, 185: 409
[24] Stokes G H, Segelstein D J, Taylor J H, et al. AJ, 1986, 311: 694
[25] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. Nature, 1982, 300: 615
[26] Johnston S, Lyne A G, Manchester R N, et al, MNRAS, 1992, 255: 401
[27] Manchester R N, Lyne A G, DAmico N, et al. MNRAS, 1996, 279: 1235
[28] Manchester R N, Lyne A G, Camilo F, et al. MNRAS, 2001, 328: 17
[29] Lyon R J, Stappers B W, Cooper S, et al. MNRAS, 2016, 459(01): 1104
[30] Sayer R W, Nice D J, Taylor J H. ApJ, 1997, 474(1): 426
[31] Cordes J M, Freire P C C, Lorimer D R, et al. ApJ, 2006, 637: 446
[32] Bird T S, Cortes-Medellin G. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Ohio: North American Radio Science Meeting, 2003, 1: 116
[33] Nan R, Li D, Jin C, et al. International Journal of Modern Physics D, 2011, 20(06): 989
[34] 汪敏, 徐永华, 王建成, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2022, 52: 11
[35] Jonas J, Team M. MeerKAT Science: On the Pathway to the SKA, 2016: 1
[36] Smits R, Kramer M, Stappers B, et al. Astronomy and Astrophysics, 2009, 493: 1161
[37] Keith M J, Jameson A, Straten V W, et al. MNRAS, 2010, 409(2): 619
[38] Stovall K, Lynch R S, Ransom S M, et al. ApJ, 2014, 791: 18
[39] Bhattacharyya B, Cooper S, Malenta M, et al. ApJ, 2016, 817(2): 130
[40] Coenen T, van Leeuwen J, Jason W T, et al. AA, 2016, 570: 16
[41] Han J L, Wang C, Wang P F, et al. RAA, 2021, 21(05): 38
[42] Faulkner A J, Stairs I H, Kramer M, et al. MNRAS, 2004, 355: 147
[43] Zeng Q, Li X, Lin H. MNRAS, 2020, 494(3): 3110
[44] Van Heerden E, Karastergiou A, Roberts S J. MNRAS, 2017, 467(2): 1661
[45] Agarwal D, Suresh J, Mandic V, et al. Physical Review D, 2022, 106(4): 3019
[46] Cacciatore F, Gómez Ruiz V, Tubmann G, et al. arXiv:2301.08744, 2023
[47] Hoskin M. The history of Astronomy: a very short Introduction, Oxford: OUP Oxford, 2003
[48] Klein B, Kramer M, Müller P, et al. Young Neutron Stars and Their Environments, 2004, 218: 133
[49] Kramer M, Champion D J. Classical and Quantum Gravity, 2013, 30(22): 4009
[50] 刘鹏, 王培, 李菂, 等. 天文学进展, 2018, 36(2): 173
[51] Johnston S, Karastergiou A, Keith M J, et al. MNRAS, 2020, 493: 3608
[52] Abbott R, Abbott T D, Acernese F, et al. ApJ, 2022, 932(02): 133
[53] Parent E, Kaspi V M, Ransom S M, et al. ApJ, 2018, 861: 15
[54] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. ApJS, 2009, 183: 46
[55] https://china.cnr.cn/news/20230207/t20230207_526146493.shtml, 2023
[56] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. ApJ, 2017, 839: 19
[57] Gill C. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 363(1): 2039
[58] Champion D J, Petroff E, Kramer M, et al. MNRAS, 2016, 460: L30
[59] Abbott B P, Abbott R, Acernese F, et al. ApJ, 2010, 713: 671
[60] Lorimer D R, Stairs I H, Freire P C, et al. ApJ, 2006, 640: 428
[61] Correia A, Paredes H, Fonseca B. Scientometrics, 2018, 114: 31
[62] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. ApJ, 2006, 636(02): 777
[63] Ransom S M, Cordes J M, Eikenberry S S. ApJ, 2003, 589(02): 911
[64] Magic C, Acciari V A, Ansoldi S, et al. AA, 2020, 643: 6
[65] Eatough R P, Keane E F, Lyne A G. MNRAS, 2009, 395(01): 410
[66] Burke-Spolaor S, Bailes M, Johnston S. MNRAS, 2001, 416(04): 2465

[67] Becker W, Kramer M, Sesana A. Space Science Reviews, 2018, 214: 41
[68] Dimoudi S, Adamek K, Thiagaraj P, et al. ApJ, 2018, 239(2): 28

Research Progress on Pulsar Search and Applications Based on Literature Analysis

SONG Yi-ning[1,2], CHEN Mao-zheng[1,3], LIU Zhi-yong[1,3]

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China)

Abstract: Pulsars have significant academic and application value in fields such as astrophysical evolution, physics, timing, deep space autonomous navigation, and gravitational wave detection, making pulsar survey and application one of the current hot topics in the astronomical community. In order to explore the current research status and future development trends in the field of pulsar survey and application, 964 relevant articles were screened from the Web of Science (WOS) database. Building upon the analysis of core articles, in-depth exploration was conducted utilizing data analysis and visualization methods. The study results reveal that research in the field of pulsar survey and application has progressed through initial exploration and steady development phases, and is currently experiencing vigorous growth. Close collaboration among nations has led to the formation of three major research groups in this field. Pulsar survey and application research are anticipated to yield significant scientific research value and practical application outcomes in the future, such as direct detection of gravitational waves and advancements in deep space autonomous navigation, thereby further enriching and diversifying the research domain of pulsars.

Key words: pulsar; pulsar survey; data analysis; visualisation; mapping knowledge